

APPLICATION UNDER UNITED STATES PATENT LAWS

Atty. Dkt. No. 061069-0309049

Invention: IMAGING OPTICAL SYSTEM AND IMAGING APPARATUS USING THE SAME

Inventor (s): Kentaro SEKIYAMA

**Address communications to the
correspondence address
associated with our Customer No**

00909

Pillsbury Winthrop LLP

This is a:

- ☐ Provisional Application
- ☒ Regular Utility Application
- ☐ Continuing Application
 - ☐ The contents of the parent are incorporated by reference
- ☐ PCT National Phase Application
- ☐ Design Application
- ☐ Reissue Application
- ☐ Plant Application
- ☐ Substitute Specification
 - Sub. Spec Filed _____
 - in App. No. _____ / _____
- ☐ Marked up Specification re
 - Sub. Spec. filed _____
 - In App. No _____ / _____

SPECIFICATION

結像光学系及びそれを用いた撮像装置

Imaging Optical System And Imaging Apparatus Using The Same

BACKGROUND OF THE INVENTION

1. Field of the Invention

本発明は、結像光学系及びこの結像光学系を備えた電子撮像装置等に関する。

2. Description of the Related Art

撮像装置において、被写体の物体距離に応じてフォーカシングする場合、従来の結像光学系では、少なくとも一つ以上のレンズを光軸方向に移動させる必要があった。その場合、レンズの移動は、ステッピングモーター等によって行なっていた。

また、レンズを移動させる代わりに、光学特性可変ミラーを用いる構成があった。(例えば、特開 2 0 0 2 - 2 8 7 0 3 3 号参照。)

また、光学系の小型化のために、光学素子を偏心して配置させたり、光を折り曲げたりする構成があった。(例えば、特開 2 0 0 0 - 2 9 8 2 3 7 号及び特開 2 0 0 3 - 0 4 3 3 5 4 号参照。)

SUMMARY OF THE INVENTION

本発明の結像光学系は、物体の像を形成する結像光学系であって、最も物体側に配置されたレンズ群 G 1 と、該レンズ群 G 1 と前記像の間に配置されたレンズ群を少なくとも 1 つ備え、前記レンズ群のうち少なくとも一つが光軸方向に移動し、前記レンズ群 G 1 は、物体側から順に少なくとも一つの負の屈折力を持つレンズと、形状可変ミラーと、少なくとも一つの正の屈折力を持つレンズとを有し、前記形状可変ミラーの変形によってフォーカシングを行う。

また、結像光学系を構成する少なくとも一つの光学面が軸上主光線に対して略垂直方向にシフト偏心しており、以下の条件を満足する。

$$|\delta / f_w| < 1.0$$

ここで、 δ は前記光学面のシフト偏心量、 f_w は広角端における前記結像光学系の焦点距離である。

また、結像光学系を構成する少なくとも1つの光学面が軸上主光線に対して略垂直方向の軸を中心としてティルト偏心しており、以下の条件を満足する。

$$|\varepsilon| < 5.0 (\text{deg})$$

ここで、 ε (deg)は前記光学面のティルト偏心量である。

また、本発明の別の結像光学系は、物体側から順に、負の屈折力を持つレンズ群G1と、正の屈折力を持つレンズ群G2と、負の屈折力を持つレンズ群G3と、正の屈折力を持つレンズ群G4と、レンズ群G5を備え、前記レンズ群G2と前記レンズ群G4が光軸方向に独立に移動し、以下の条件のいずれか一方を満足する。

$$0.1 < f_{G2} / f_w$$

$$0.1 < f_{G4} / f_w$$

ここで、 f_{G2} は前記レンズ群G2の焦点距離、 f_{G4} は前記レンズ群G4の焦点距離、 f_w は広角端における前記結像光学系の焦点距離である。

また、本発明の更に別の結像光学系は、変倍時に光軸方向に移動するレンズ群を一つ以上有する結像光学系であって、前記レンズ群は、相対的に偏心している少なくとも2つレンズを、該レンズ群中に有している。

また、本発明の撮像装置は、上記の結像光学系と、撮像素子を備えている。

本発明の結像光学系によれば、レンズの可動群が少なく、小型で、消費電力が少なく、動作音が静かな光学系及びそれを用いた光学装置を提供することができる。

These and other features and advantages of the present invention will become apparent from the following detailed description of the preferred embodiments when taken in conjunction with the accompanying drawings.

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

図1A、1B及び1Cはそれぞれ本発明における実施例1の光学系の広角端、標準状態及び望遠端でのY-Z断面図であり、図1A中の矢印は各光学要素の偏心の方向を示している。

図2は本発明における実施例1の物点距離無限遠時の広角端における横収差を表す図である。

図3は本発明における実施例1の物点距離無限遠時の標準状態における横収差

を表す図である。

図 4 は本発明における実施例 1 の物点距離無限遠時の望遠端における横収差を表す図である。

図 5 A, 5 B 及び 5 C はそれぞれ本発明における実施例 2 の光学系の広角端, 標準状態及び望遠端での Y-Z 断面図である。

図 6 は本発明における実施例 2 の物点距離無限遠時の広角端における横収差を表す図である。

図 7 は本発明における実施例 2 の物点距離無限遠時の標準状態における横収差を表す図である。

図 8 は本発明における実施例 2 の物点距離無限遠時の望遠端における横収差を表す図である。

図 9 は結像光学系に可変形状鏡を適用した場合の概略構成図である。

図 10 は可変形状鏡の他の例を示す概略構成図である。

図 11 は図 10 の例の可変形状鏡に用いる電極の一形態を示す説明図である。

図 12 は図 10 の例の可変形状鏡に用いる電極の他の形態を示す説明図である。

図 13 は可変形状鏡のさらに他の例を示す概略構成図である。

図 14 は可変形状鏡のさらに他の例を示す概略構成図である。

図 15 は可変形状鏡のさらに他の例を示す概略構成図である。

図 16 は図 15 の例における薄膜コイル 427 の巻密度の状態を示す説明図である。

図 17 は可変形状鏡 409 のさらに他の例を示す概略構成図である。

図 18 は図 17 の例におけるコイル 427 の一配置例を示す説明図である。

図 19 は図 17 の例におけるコイル 427 の他の配置例を示す説明図である。

図 20 は図 15 に示した例において、コイル 427 の配置を図 19 に示したようにした場合に適する永久磁石 426 の配置を示す説明図である。

図 21 は本発明のさらに他の光学装置に適用可能な可変形状鏡 409 を用いた撮像光学系、例えば携帯電話のデジタルカメラ、カプセル内視鏡、電子内視鏡、パソコン用デジタルカメラ、PDA 用デジタルカメラ等に用いられる撮像光学系の概略構成図である。

図 2 2 は可変形状鏡のさらに他の例に係る、マイクロポンプで流体を出し入れし、レンズ面を変形させる可変形状鏡の概略構成図である。

図 2 3 は可変形状鏡に適用可能なマイクロポンプの一例を示す概略構成図である。

図 2 4 は可変焦点レンズとしての可変焦点ミラーの一例の構成を示す図である。

図 2 5 は可変形状鏡のさらに他の例を示す概略構成図である。

DETAILED DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS

以下、本発明の結像光学系及びこの結像光学系を用いた撮像装置について説明する。

本発明の結像光学系は、最も物体側にレンズ群 G 1 を有し、レンズ群 G 1 と像面の間にレンズ群が配置されている。そして、このレンズ群のうち少なくとも一つのレンズ群が、光軸方向に独立に移動することで変倍を行う。また、レンズ群 G 1 は、物体側から順に少なくとも一つの負の屈折力を持つレンズと、形状可変ミラーと、少なくとも一つの正の屈折力を持つレンズとを有する。

この結像光学系では、形状可変ミラーの変形でフォーカシングを行う。そこで、形状可変ミラーの物体側に負レンズを配置している。また、このレンズには、通常の負先行型の撮像光学系に比べて、強い負のパワーを与えている。この負レンズに強い負のパワーを与えると、形状可変ミラーよりも像側にある光学系は、像を形成するために強い正のパワーを持つことになる。その結果、形状可変ミラーよりも像側にある光学系の結像倍率を高くすることができる。仮に、形状可変ミラーよりも像側にある光学系の倍率が低いと、フォーカシングに必要な形状可変ミラーの変形量が大きくなる。その結果、収差の発生量が大きくなる。しかしながら、上記のような構成であれば、フォーカシングに必要な形状可変ミラーの変形量を小さくすることができる。

ただし、上記負レンズのパワーが強くなると、レンズ群 G 1 のパワーが強くなる。その結果、偏心誤差に対する性能が劣化する恐れがある。そこで、形状可変ミラーの像側に正レンズを配置することで、負レンズのパワーを強くしつつ、レンズ群 G 1 全体のパワーの適正化を図っている。このように、形状可変ミラーを挟んで負レンズと正レンズを少なくとも 1 つ配置することで、レンズ群 G 1 の偏

心誤差に対する性能劣化を小さくしている。

また、結像光学系において、形状可変ミラーの物体側と像側に隣接して配置されたレンズ群を備え、下記条件のいずれか一方を満足するのが好ましい。

$$0.1 < d1 / fw < 10.0 \quad \cdots \quad (1-1)$$

$$0.1 < d2 / fw < 10.0 \quad \cdots \quad (1-2)$$

ここで、 $d1$ は物体側に隣接配置されたレンズ群と形状可変ミラーのとの間隔、 $d2$ は像側に隣接配置されたレンズ群と形状可変ミラーとの間隔、 fw は広角端における結像光学系の焦点距離である。

なお、焦点距離は、形状可変ミラーが平面状態における焦点距離として定義する。これは、以下の説明においても同様である。また、上記間隔は、形状可変ミラーに最も近いレンズ面から形状可変ミラーまでの距離である。

条件式(1-1)または(1-2)の上限を上回ると、結像光学系のサイズが大きくなってしまう。また、形状可変ミラーの反射面の面積が大きくなるため、面形状の制御や形状可変ミラー自体の製作が困難になる。

一方、条件式(1-1)または(1-2)の下限を下回ると、形状可変ミラーとその前後のレンズ群との間隔が小さくなり過ぎる。そのため、それぞれのレンズ群の配置が困難になる。

なお、レンズ群の具体的な構成には、1つのレンズによる構成、複数のレンズによる構成の両方を含む。

また、結像光学系において以下の条件を満足することが好ましい。

$$0.2 < |fG1 / fw| \quad \cdots \quad (3-1)$$

ここで、 $fG1$ はレンズ群 $G1$ の焦点距離、 fw は広角端における結像光学系の焦点距離である。

条件式(3-1)を満足することで、レンズ群 $G1$ のパワーを適正な範囲に抑えることができる。その結果、レンズ群 $G1$ に偏心誤差が存在しても、性能劣化を抑えることができる。

なお、条件式(3-1)に代えて、以下の条件を満足するのが更に好ましい。

$$0.5 < |fG1 / fw| \quad \cdots \quad (3-2)$$

この条件を満たせば、レンズ群 $G1$ の偏心誤差に対する感度がさらに低くなる。

また、条件式（３－１）及び（３－２）において、上限は５０未満であることが望ましい。

また、結像光学系は、移動する少なくとも１つのレンズ群が、以下の条件を満足するのが好ましい。

$$0.1 < |f_{Gm}/f_w| \quad \dots \quad (4-1)$$

ここで f_{Gm} は移動するレンズ群の焦点距離、 f_w は広角端における結像光学系の焦点距離である。

条件式（４－１）を満たすことで、変倍時に移動するレンズ群のパワーを適正な範囲に抑えることができる。その結果、レンズ群 G_1 に偏心誤差が存在しても、性能劣化を抑えることができる。

なお、条件式（４－１）に代えて、以下の条件を満足するのが更に好ましい。

$$0.25 < |f_{Gm}/f_w| \quad \dots \quad (4-2)$$

この条件を満たせば、偏心誤差に対する感度がさらに低くなる。また、条件式（４－１）及び（４－２）において、上限は１００未満であることが望ましい。

また、結像光学系は、レンズ群 G_1 は形状可変ミラーよりも像側にレンズ群 G_{1p} を有し、以下の条件を満足することが好ましい。

$$0.1 < |f_{G1p}/f_w| \quad \dots \quad (5-1)$$

ここで、 f_{G1p} はレンズ群 G_{1p} の焦点距離、 f_w は広角端における結像光学系の焦点距離である。

条件式（５－１）を満たすことで、結像光学系のいずれかのレンズ（光学素子）に偏心誤差が存在する場合でも、光学性能の劣化を抑えることができる。

なお、条件式（５－１）に代えて、以下の条件を満足するのが更に好ましい。

$$0.2 < |f_{G1p}/f_w| \quad \dots \quad (5-2)$$

この条件を満たせば、偏心誤差に対する性能劣化をさらに小さくすることができる。また、条件式（５－１）及び（５－２）において、上限は２００未満であることが望ましい。

また、結像光学系は、形状可変ミラー所定の範囲内で形状を変化させることができ、この所定の範囲内の一状態で以下の条件のいずれか一方を満足することが好ましい。

$$|C4 \times f_w| < 0.2 \quad \cdots \quad (6-1)$$

$$|C6 \times f_w| < 0.2 \quad \cdots \quad (6-2)$$

ここで、C4は形状可変ミラーの反射面の形状をXとYの多項式で表したときのX²の項における係数、C6はこの多項式のY²の項における係数、f_wは広角端における結像光学系の焦点距離である。

条件式(6-1)または(6-2)を満たすことで、形状可変ミラーの焦点距離の変動を適正な範囲に抑えることができる。その結果、形状可変ミラーで発生する収差量を低くすることができる。

なお、条件式(6-3)及び(6-4)に代えて、以下の条件を満足するのが更に好ましい。

$$|C4 \times f_w| < 0.05 \quad \cdots \quad (6-3)$$

$$|C6 \times f_w| < 0.05 \quad \cdots \quad (6-4)$$

上記条件のいずれか一方を満たせば、形状可変ミラーで発生する収差量をさらに低減できる。また、条件式(6-1)、(6-2)、(6-3)及び(6-4)において、下限は0よりも大きいことが望ましい。

また、結像光学系において、前記形状可変ミラーは、以下の条件を満足するように配置されていることが好ましい。

$$35^\circ < \theta < 105^\circ \quad \cdots \quad (7-1)$$

ここで、 θ は前記形状可変ミラーへ入射する軸上主光線の入射角と、前記形状可変ミラーから出射する軸上主光線の出射角の和である。

なお、軸上主光線とは、物体中心を出て絞り中心を通り、像中心に到達する光線のことを指す。これは、以下の説明についても同じである。

また、入射角とは、形状可変ミラーの面の法線と、形状可変ミラーに入射する軸上主光線とがなす角度である。また、射出角とは、形状可変ミラーの面の法線と、形状可変ミラーから射出する軸上主光線とがなす角度である。また、ここでの形状可変ミラーの面とは、形状可変ミラーの面が平面の場合である。

なお、 θ は、形状可変ミラーによる軸上主光線の折り曲げ角ということもできる。

条件式(7-1)の上限を上回ると、形状可変ミラーに入射する軸上主光線が

斜入射になりすぎる。そのため、形状可変ミラーで発生する収差が増大する。さらに、形状可変ミラーの長手方向のサイズが大きくなるため、低コスト化が困難になる。

一方、条件式(7-1)の下限を下回ると、形状可変ミラーのサイズは小さくなる。ただし、形状可変ミラーの前後の光学素子が機械的に干渉するため、それぞれの配置が難しくなる。

なお、条件式(7-1)に代えて、以下の条件を満足するのが更に好ましい。

$$75^{\circ} < \theta < 105^{\circ} \quad \dots \quad (7-2)$$

また、結像光学系は、この結像光学系を構成する少なくとも1つの光学面が軸上主光線に対して略垂直方向にシフト偏心しており、以下の条件を満足することが好ましい。

$$|\delta / fw| < 1.0 \quad \dots \quad (8-1)$$

ここで、 δ は光学面のシフト偏心量、 fw は広角端における結像光学系の焦点距離である。

結像光学系は、光学面あるいはレンズで構成されている。そこで、少なくとも1つの光学面あるいはレンズを、軸上主光線に対してほぼ垂直方向にシフトさせることで、形状可変ミラーで発生する収差をキャンセルすることができる。

さらに条件式(8-1)を満たすことで、光学面あるいはレンズのシフト量を適正な範囲に抑えつつ、形状可変ミラーで発生する収差をキャンセルすることができる。また、条件式(8-1)において、下限は0よりも大きいことが望ましい。

また、結像光学系において、この結像光学系を構成する少なくとも1つの光学面が軸上主光線に対して略垂直方向の軸を中心としてティルト偏心しており、以下の条件を満足することが好ましい。

$$|\varepsilon| < 5.0(\text{deg}) \quad \dots \quad (9-1)$$

ここで、 $\varepsilon(\text{deg})$ は前記光学面のティルト偏心量である。

上述のように、結像光学系は、光学面あるいはレンズで構成されている。そこで、光学面あるいはレンズを、軸上主光線に対してほぼ垂直方向の軸を中心としてティルトさせることで、形状可変ミラーで発生する収差をキャンセルできる。

さらに条件式（９－１）を満たすことで、レンズまたは撮像面のティルト量を適正な範囲に抑えつつ、形状可変ミラーで発生する収差をキャンセルすることができる。

なお、条件式（９－１）に代えて、以下の条件を満足するのが更に好ましい。

$$|\varepsilon| < 2.0 \quad \dots \quad (9-2)$$

また、条件式（９－１）及び（９－２）において、下限は０よりも大きいことが望ましい。

また、結像光学系において、レンズ群Ｇ１は負の屈折力を有し、レンズ群Ｇ１と像の間に配置されたレンズ群として、正の屈折力を持つレンズ群Ｇ２と、負の屈折力を持つレンズ群Ｇ３と、正の屈折力を持つレンズ群Ｇ４と、レンズ群Ｇ５を備え、光軸方向に移動するレンズ群は、レンズ群Ｇ２とレンズ群Ｇ４であり、レンズ群Ｇ２とレンズ群Ｇ４は、それぞれ独立に移動することが好ましい。

また、結像光学系において、光軸方向に移動するレンズ群は、相対的に偏心している少なくとも２つのレンズを、レンズ群中に有していることが好ましい

レンズを偏心させて配置することで、形状可変ミラーで発生する収差を適正な範囲に抑えることができる。特に、結像光学系が変倍光学系である場合、広角端から望遠端までの全ての状態で、形状可変ミラーで発生する収差を適正な範囲に抑えることができる。なお、この場合の偏心はシフトである。

また、結像光学系は絞りを備え、この絞りが変倍時に移動しないことが好ましい。絞りは、シャッターの近くに配置されることが多い。よって、上記のようにすると、変倍時に絞りが移動しないため、シャッターも変倍時に固定できる。その結果、機械的な構造を簡略化できるメリットがある。

また、結像光学系において、以下の条件を満足することが好ましい。

$$|f_{G3}/f_w| < 15.0 \quad \dots \quad (10-1)$$

ここで、 f_{G3} はレンズ群Ｇ３の焦点距離、 f_w は広角端における結像光学系の焦点距離である。

条件式（１０－１）を満足することで、結像光学系のペッツバール和を小さくすることができる。その結果、像面湾曲を適正な範囲に抑えることができる。

なお、条件式（１０－１）に代えて、以下の条件を満足するのが更に好ましい

$$|f_{G3}/f_w| < 10.0 \quad \dots \quad (10-2)$$

この条件を満足すれば、像面湾曲をさらに小さくできる。

また、本発明の別の結像光学系は、物体側から順に、負の屈折力を持つレンズ群G1と、正の屈折力を持つレンズ群G2と、負の屈折力を持つレンズ群G3と、正の屈折力を持つレンズ群G4と、レンズ群G5を備えている。そして、レンズ群G2と前記レンズ群G4が光軸方向に独立に移動する。そして更に、以下の条件のいずれか一方を満足する。

$$0.1 < f_{G2}/f_w \quad \dots \quad (11-1)$$

$$0.1 < f_{G4}/f_w \quad \dots \quad (11-2)$$

ここで、 f_{G2} はレンズ群G2の焦点距離、 f_{G4} はレンズ群G4の焦点距離、 f_w は広角端における結像光学系の焦点距離である。

条件式(11-1)または(11-2)を満たすことで、変倍時に移動するレンズ群のパワーを適正な範囲に抑えることができる。その結果、レンズ群G1に偏心誤差が存在しても、性能劣化を抑えることができる。

なお、条件式(11-1)及び(11-2)に代えて、以下の条件を満足するのが更に好ましい。

$$0.25 < f_{G2}/f_w \quad \dots \quad (11-3)$$

$$0.25 < f_{G4}/f_w \quad \dots \quad (11-4)$$

この条件のいずれか一方を満たせば、偏心誤差に対する感度がさらに低くなる。また、条件式(11-1)、(11-2)、(11-3)及び(11-4)において、上限は100未満であることが望ましい。

また、結像光学系において、レンズ群G1が少なくとも一つの反射光学素子を有することが好ましい。レンズ群G1が反射光学素子を有することで、結像光学系の光路を折り曲げることができる。そして、その折り曲げ位置が物体側にあるため、結像光学系を薄型にすることが可能となる。

また、結像光学系において、反射光学素子の物体側と像側に、隣接して配置されたレンズ群を備えるのが好ましい。そして更に、下記条件のいずれか一方を満足することが好ましい。

$$0.1 < D1 / fw < 10.0 \quad \cdots \quad (12-1)$$

$$0.1 < D2 / fw < 10.0 \quad \cdots \quad (12-2)$$

ここで、D1は物体側に隣接配置されたレンズ群と反射光学素子のとの間隔、D2は像側に隣接配置されたレンズ群と反射光学素子のとの間隔、fwは広角端における結像光学系の焦点距離である。

条件式(12-1)または(12-2)の上限を上回ると、結像光学系のコンパクト化が困難になる。また、条件式(12-1)または(12-2)の下限を下回ると、反射光学素子とその前後のレンズとの間隔が小さくなる。その結果、反射光学素子とレンズが機械的に干渉するため、それぞれの光学素子の配置が困難になる。

また、レンズ群G5を備える結像光学系において、以下の条件を満足するのが好ましい。

$$0.2 < |fG5 / fw| \quad \cdots \quad (13-1)$$

ここで、fG5はレンズ群G5の焦点距離、fwは広角端における結像光学系の焦点距離である。

条件式(13-1)を満たすことで、レンズ群G1に偏心誤差が存在しても性能劣化を抑えることができる。また、条件式(13-1)において、上限は20未満であることが望ましい。

以上の説明では、結像光学系として、物体の像を記録媒体(撮像素子やフィルム)上に像を形成する光学系を想定している。ただし、このような光学系に限定されるものではない。例えば、物体面と像面を入れ替えることで、プロジェクター等の投影光学系としても使用することができる。

また、形状可変ミラー自体は、反射面の変形による焦点距離の変化が小さい。そのため、形状可変ミラーを通常の反射光学素子で置き換えても、上述の議論は適用できる。

なお、本発明で使用する自由曲面とは以下の式(a)で定義されるものである。この定義式のZ軸が自由曲面の軸となる。

また、上記の回転非対称な曲面形状の面である自由曲面の他の定義式として、Z e r n i k e 多項式により定義できる。この面の形状は以下の式 (b) により定義する。その定義式 (b) の Z 軸が Z e r n i k e 多項式の軸となる。回転非対称面の定義は、X-Y 面に対する Z の高さの極座標で定義され、R は X-Y 面内の Z 軸からの距離、A は Z 軸回りの方位角で、Z 軸から測った回転角で表せられる。

$$X = R \times \cos(A)$$

$$Y = R \times \sin(A)$$

$$Z = D^2$$

$$+ D_3 \ R \cos(A) + D_4 \ R \sin(A)$$

$$+ D5 \ R^2 \cos(2A) + D6 \ (R^2 - 1) + D7 \ R^2 \sin(2A)$$

$$+ D 8 \quad R 3 \cos(3A) + D 9 \quad (3 R 3 - 2 R) \cos(A)$$

$$+ D_{10} (3 R_3 - 2 R) \sin(A) + D_{11} R_3 \sin(3A)$$

$$+ D_{12} R_4 \cos(4A) + D_{13} (4 R_4^2 - 3 R_2^2) \cos(2A)$$

$$+D14 (6 R^4 - 6 R^2 + 1) + D15 (4 R^4 - 3 R^2) \sin(2A)$$

$$+ D_{16} R_4 \sin(4A) + D_{17} R_5 \cos(5A) + D_{18} (5 R_5^2 - 4 R_3^2) \cos(3A)$$

$$+ D_{19} (10 R_5 - 12 R_3 + 3 R) \cos(A)$$

$$+ D_{20} (10 R_5 - 12 R_3 + 3 R) \sin(A)$$

$$+ D_{21} (5 R_5 - 4 R_3) \sin(3A) + D_{22} R_5 \sin(5A)$$

$$+ D_{23} R_6 \cos(6A) + D_{24} (6 R_6^2 - 5 R_4^2) \cos(4A)$$

$$+ D_{25} (1.5 R_6 - 2.0 R_4 + 6 R_2) \cos(2A)$$

$$+ D_{26} (20 R_6 - 30 R_4 + 12 R_2 - 1)$$

$$+ D_{27} (15 R_6 - 20 R_4 + 6 R_2) \sin(2A)$$

$$+ D_{28} (6 R_6 - 5 R_4) \sin(4A) + D_{29} R_6 \sin(6A)$$

$$+ \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad \dots \text{ (b)}$$

ただし、 D_m (m は2以上の整数)は係数である。なお、X軸方向に対称な光学系として設計するには、 D_4 , D_5 , D_6 , D_{10} , D_{11} , D_{12} , D_{13} , D_{14} , D_{20} , D_{21} , D_{22} ...を利用する。

上記定義式は、回転非対称な曲面の例示のために示したものであり、他のいか

なる定義式に対しても同じ効果が得られることは言うまでもない。数学的に同値ならば他の定義で曲面形状を表してもよい。

本発明においては、上記 (a) 式における X の奇数次の項を全て 0 とすることで、y-z 面と平行な対称面を持つ自由曲面としている。

なお、非球面形状は、光軸方向を Z、光軸に直行する方向を Y にとり、円錐係数を k、非球面係数を a、b、c 及び d としたとき、次式 (c) で表される。

$$Z = (Y^2 / r) / [1 + \{1 - (1 + k) \cdot (Y / r)^2\}^{1/2}] \\ + a y^4 + b y^6 + c y^8 + d y^{10} \quad \cdots (c)$$

なお、上記数値データに関する説明は、本発明の各実施例の数値データに共通である。以下、本発明である結像光学系の実施例について説明する。

実施例 1

実施例 1 の結像光学系の断面図を図 1 に示す。また、実施例 1 の物点距離無限遠における横収差図を、図 2 乃至図 4 に示す。図 2 は広角端での横収差図、図 3 は標準状態での横収差図、図 4 は望遠端での横収差図である。これらの収差図において、実線は波長 656.27nm、点線は波長 587.56nm、一点鎖線は波長 546.07nm、破線は波長 486.13nm、二点鎖線は波長 435.83nm での収差曲線をそれぞれ示している。

実施例 1 の結像光学系は、物体側から順に配置された、第 1 レンズ群 G 1 ～第 5 レンズ群 G 5 で構成されている。

第 1 レンズ群 G 1 は負の屈折力を有し、物体側より順に配置された、両凹レンズ、形状可変ミラー及び凸の正メニスカスレンズで構成されている。第 2 レンズ群 G 2 は正の屈折力を有し、負正の接合レンズで構成されている。この接合レンズは、物体側に凸の負メニスカスレンズと両凸レンズから構成されている。第 3 レンズ群 G 3 は負の屈折力を有し、負正の接合レンズで構成されている。この接合レンズは、両凹レンズと物体側に凸の正メニスカスレンズから構成されている。第 4 レンズ群 G 4 は正の屈折力を有し、両凸レンズと、正負の接合レンズで構成されている。この接合レンズは、両凸レンズと両凹レンズから構成されている。第 5 レンズ群 G 5 は正の屈折力を有し、両凸レンズで構成されている。

非球面(ASP)は、第 1 レンズ群 G 1 の両凹レンズの像側面、第 2 レンズ群 G 2

の接合レンズの像側面、第4レンズ群の凸単レンズの両面に設けられている。自由曲面(FFS)は、形状可変ミラーのミラー面である。

第1レンズ群G1は、両凹レンズがY軸(+)方向にシフトしており、更にティルトが加わっている。また、正メニスカスレンズがY軸(-)方向にシフトしている。また、第2レンズ群G2は、接合レンズ全体がY軸(+)方向にシフトしている。また、第3レンズ群G3は、接合レンズ全体がY軸(-)方向にシフトしている。また、第4レンズ群G4は、両凸レンズが接合レンズ全体がY軸(+)方向にシフトしている。一方、接合レンズがY軸(-)方向にシフトしている。また、第5レンズ群G5は、両凸レンズがY軸(-)方向にシフトしている。また、像面に配置された撮像素子は、ティルトが加わっている。

第2レンズ群G2と第4レンズ群G4は、それぞれ光軸方向に独立に移動する。これにより、結像光学系の変倍を行うことができる。なお、実施例1では、変倍比は3である。

また、形状可変ミラーでフォーカシングを行う。これにより、鏡枠構造が簡単になり、小型化、低コスト化を実現することができる。さらに、フォーカシング時のモーターの駆動音がなくなるメリットがある。

実施例2

実施例2の結像光学系の断面図を図5に示す。また、実施例2の物点距離無限遠における横収差図を、図6乃至図8に示す。図6は広角端での横収差図、図7は標準状態での横収差図、図8は望遠端での横収差図である。

実施例2は、形状可変ミラーを含まない共軸系の結像光学系の実施例である。実施例2の結像光学系は、物体側から順に配置された、第1レンズ群G1～第5レンズ群G5で構成されている。

第1レンズ群G1は負の屈折力を有し、両凹レンズ及び正レンズで構成されている。第2レンズ群G2は正の屈折力を有し、接合レンズで構成されている。この接合レンズは、物体側に凸の負メニスカスレンズと両凸レンズから構成されている。第3レンズ群G3は負の屈折力を有し、接合レンズで構成されている。この接合レンズは、両凹レンズと物体側に凸の正メニスカスレンズから構成されている。第4レンズ群G4は正の屈折力を有し、両凸レンズと、接合レンズで構成

ている。この接合レンズは、両凸レンズと両凹レンズから構成されている。第5レンズ群G 5は正の屈折力を有し、両凸レンズで構成されている。

非球面(ASP)は、第1レンズ群G 1の両凹レンズの像側面、第2レンズ群G 2の接合レンズの像側面、第4レンズ群の凸単レンズの両面に設けられている。

第2レンズ群G 2と第4レンズ群G 4は、それぞれ光軸方向に独立に移動する。これにより、結像光学系の変倍を行うことができる。なお、実施例2では、変倍比は3である。変倍時に絞りが固定なので、シャッターも変倍時に固定できる。そのため、鏡枠構造が簡単になり低コスト化を実現できる。

以下の実施例の中で、“S”は絞り、“A S P”は非球面、“F F S”は自由曲面、“D M”は形状可変ミラーを表す。データに記載されていない非球面、自由曲面等に関する項は0である。また、E-06あるいはeは、10⁻⁰⁶のことである。また、“W E”、“S T”、“T E”はそれぞれ広角端、標準状態、望遠端での状態を表す。可変の間隔D_i (i = 1、2、3)は、順に広角端、標準状態、望遠端での値を表す。屈折率、アッペ数はともにd線(波長587.56nm)に対するものを表記してある。長さの単位はmm、角度の単位はdegである。また、各実施例ともに最像面側に2枚の平行平板を挿入している。これらは撮像素子のカバーガラス、IRカットフィルタ、ローパスフィルタを想定したものである。

また、実施例では、物体面における座標系のZ軸を、物体中心を通り、物体面に垂直な直線で定義する。このZ軸と直交する方向をY軸とし、このY軸及びZ軸と右手直交座標系を構成する軸をX軸とする。また、光線が反射面で反射された後の光学系の座標系は、反射前の座標系をX軸中心に180°回転させたものとして定義する。これによって、常に光学系のZ軸正方向に沿って光線が進行することになる。

また、光軸は物体面中心と絞り中心、あるいは物体面中心と射出瞳を通る光線の通り道で定義する。従って、光軸は、一般的には形状可変ミラーの変形と共に変化することになるが、その変化はわずかである場合が多い。よって、以下の実施例では、Z軸と光軸が略一致することになる。

偏心面は、座標系の原点から、面の面頂位置のシフト(X軸方向、Y軸方向及びZ軸方向をそれぞれX、Y及びZ)と、面の中心軸(自由曲面については、前記

(a) 式の Z 軸) の X 軸、Y 軸及び Z 軸それぞれを中心とするティルト (それぞれ α 、 β 及び γ (deg)) で与えられる。偏心を行うときの座標系の原点は、偏心を行う面を k 面としたとき、 $k - 1$ 面の面頂位置から Z 軸方向に面間隔の分だけ移動した点とする。

偏心の順序は、X シフト、Y シフト、Z シフト、 α ティルト、 β ティルト及び γ ティルトの順である。なお、その場合 α と β の正は、X 軸及び Y 軸それぞれをマイナス側から見たときの反時計回り方向を、 γ の正は Z 軸をマイナス方向から見たときの時計回り方向で定義する。

なお、偏心にはディセンタアンドリターン (以下 D A R) とディセンタオンリー (以下 D E O) の 2 種類がある。D A R による偏心では、 k 面が偏心していたとき、 $k + 1$ 面以降の座標系は偏心前の k 面の座標系と一致する。 $k + 1$ 面の面頂位置は、偏心前の k 面の面頂位置から Z 軸方向に面間隔の分だけ移動した点として定義する。一方、D E O では、 k 面が偏心していたとき、 $k + 1$ 面以降の座標系は偏心後の k 面の座標系と一致する。 $k + 1$ 面の面頂位置は、偏心後の k 面の面頂位置から Z 軸方向に面間隔の分だけ移動した点として定義する。

また、反射面の座標系の Z 軸正方向は、表面から裏面側に向かう方向になる。従って、反射面が X Y 多項式で表される自由曲面形状に変形している場合、パワー成分である C_4 、 C_6 が正のとき、凸面ミラーになる。つまり、負のパワーを持つミラーになる。逆に、パワー成分である C_4 、 C_6 が負のとき、凹面ミラーになる。つまり、正のパワーを持つミラーになる。

形状可変ミラーは、コントラスト方式のオートフォーカスを行う。そのために、遠点合焦時よりも弱いパワーの状態、及び近点合焦時よりも強いパワーの状態を取れるように設計されている。

なお、遠点合焦時よりも弱いパワーの形状に変形した状態を遠点余裕、近点合焦時よりも強いパワーの形状に変形状態を近点余裕と定義している。つまり、形状可変ミラーは遠点余裕、遠点、近点、近点余裕の 4 状態が存在する。そして、それぞれの状態において、変倍の広角端、標準状態、望遠端の 3 状態が存在する。よって、合計で 12 種類の変形状態が存在する。

なお、形状可変ミラーは、実際の製作時の製造誤差による像面の Z 方向のずれ

、及び温度変化による像面のZ方向のずれを考慮して設計されている。よって、フォーカスするために変形する範囲に加えて、その変形範囲の前後に変形量の余裕を持たせた設計になっている。

実施例1の数値データ

焦点距離 : 4.4mm～13.2mm

開放Fナンバー : 2.4～5.3

撮像面のサイズ : 4.0mm×3.0mm

面番号	曲率半径	面間隔	偏心	屈折率	アッペ数
1	∞(仮想面)	0.00			
2	-50.749	1.00	偏心(1)	1.7800	50.0
3	ASP[1]	(第1面に戻る)			
4	∞(仮想面)	7.60			
5	∞	0.00	偏心(2)		
6	FFS[1](DM)	0.00	偏心(3)		
7	∞	4.64	偏心(2)		
8	19.941	1.27	偏心(4)	1.8500	24.0
9	29.657	D1	偏心(4)		
10	21.472	1.00	偏心(5)	1.8500	24.0
11	10.211	1.86	偏心(5)	1.6173	57.3
12	ASP[2]	D2	偏心(5)		
13	-14.920(S)	1.00	偏心(6)	1.7281	48.3
14	11.255	1.33	偏心(6)	1.8500	24.0
15	77.407	D3	偏心(6)		
16	ASP[3]	3.56	偏心(7)	1.4900	70.0
17	ASP[4]	0.75	偏心(7)		
18	9.803	2.77	偏心(8)	1.5269	65.1
19	-7.449	3.89	偏心(8)	1.7727	31.5
20	4.259	D4	偏心(8)		
21	7.432	2.13	偏心(9)	1.4900	70.0

22	-14.274	0.30	偏心(9)		
23	∞	1.44		1.5477	62.8
24	∞	0.10			
25	∞	0.60		1.5163	64.1
26	∞	0.50			
27	∞ (像面)		偏心(10)		

WE ~ ST ~ TE

D1 = 8.54 ~ 1.80 ~ 0.10

D2 = 1.70 ~ 8.44 ~ 10.14

D3 = 8.55 ~ 6.17 ~ 0.20

D4 = 3.27 ~ 5.65 ~ 11.62

ASP[1]

曲率半径 -7.179 k 0.0000e+000

a 3.8858e-004 b 3.6372e-006 c 8.8491e-008 d -3.2705e-010

ASP[2]

曲率半径 -16.032 k 0.0000e+000

a 4.4224e-005 b 5.4185e-009 c 1.6428e-008 d -7.0199e-010

ASP[3]

曲率半径 7.704 k 0.0000e+000

a -1.6991e-004 b -1.7112e-007 c 3.8286e-008 d -7.0832e-009

ASP[4]

曲率半径 -12.011 k 0.0000e+000

a 2.8459e-004 b 1.9921e-006 c -1.3381e-007 d -3.1611e-009

偏心[1] (DEO)

X 0.000 Y 0.064 Z 0.000 α -0.759 β 0.000 γ 0.000

偏心[2] (DEO)

X 0.000 Y 0.000 Z 0.000 α 45.000 β 0.000 γ 0.000

偏心[3] (DAR)

X 0.000 Y (FFS[1]に記載) Z (FFS[1]に記載)
 α -0.285 β 0.000 γ 0.000

偏心[4] (DAR)

X 0.000 Y -0.003 Z 0.000 α 0.000 β 0.000 γ 0.000

偏心[5] (DAR)

X 0.000 Y 0.047 Z 0.000 α 0.000 β 0.000 γ 0.000

偏心[6] (DAR)

X 0.000 Y -0.071 Z 0.000 α 0.000 β 0.000 γ 0.000

偏心[7] (DAR)

X 0.000 Y 0.014 Z 0.000 α 0.000 β 0.000 γ 0.000

偏心[8] (DAR)

X 0.000 Y -0.002 Z 0.000 α 0.000 β 0.000 γ 0.000

偏心[9] (DAR)

X 0.000 Y -0.189 Z 0.000 α 0.000 β 0.000 γ 0.000

偏心[10] (DAR)

X 0.000 Y 0.000 Z 0.000 α -1.146 β 0.000 γ 0.000

FFS[1]

	WE 遠点余裕	ST 遠点余裕	TE 遠点余裕
C4	0.00000	0.00000	0.00000
C6	0.00000	0.00000	0.00000
C8	0.00000	0.00000	0.00000
C10	0.00000	0.00000	0.00000
C11	0.00000	0.00000	0.00000

C13	0.00000	0.00000	0.00000
C15	0.00000	0.00000	0.00000
C17	0.00000	0.00000	0.00000
C19	0.00000	0.00000	0.00000
C21	0.00000	0.00000	0.00000
Y	0.00000	0.00000	0.00000
Z	0.00000	0.00000	0.00000

	WE ∞	ST ∞	TE ∞
C4	-0.5900E-03	-0.2265E-03	-0.1063E-03
C6	-0.2942E-03	-0.1118E-03	-0.5118E-04
C8	-0.1190E-04	-0.7626E-05	-0.3054E-05
C10	-0.5236E-05	-0.2958E-05	-0.1320E-05
C11	0.6539E-05	0.2526E-05	0.1742E-05
C13	0.5614E-05	0.1972E-05	0.1505E-05
C15	0.1585E-05	0.6526E-06	0.3945E-06
C17	0.5436E-06	0.2566E-06	0.1161E-06
C19	-0.1984E-07	-0.7409E-07	-0.7818E-07
C21	0.1441E-06	0.5020E-07	0.2135E-07
Y	0.02568	0.06727	-0.28997
Z	0.00757	0.00280	0.00119

	WE300mm	ST300mm	TE300mm
C4	-0.8999E-03	-0.5520E-03	-0.4454E-03
C6	-0.4603E-03	-0.2822E-03	-0.2330E-03
C8	-0.1271E-04	-0.1511E-04	-0.1532E-04
C10	-0.9223E-05	-0.8088E-05	-0.9339E-05
C11	0.5833E-05	0.1082E-05	0.6791E-06
C13	0.5224E-05	0.8552E-06	0.3799E-06

C15	0.1353E-05	-0.2418E-06	0.5888E-07
C17	-0.1388E-06	-0.2624E-06	-0.1260E-06
C19	0.2954E-06	-0.1218E-07	0.9767E-07
C21	0.1264E-06	-0.6137E-07	0.4632E-07
Y	0.18132	0.46081	0.45036
Z	0.01270	0.00836	0.00675

	WE 近点余裕	ST 近点余裕	TE 近点余裕
C4	-0.1430E-02	-0.7664E-03	-0.5480E-03
C6	-0.7424E-03	-0.3990E-03	-0.2865E-03
C8	-0.3091E-04	-0.2675E-04	-0.2151E-04
C10	-0.2561E-04	-0.1455E-04	-0.1164E-04
C11	0.7565E-05	0.2368E-05	0.1185E-05
C13	0.5863E-05	0.2277E-05	0.1879E-06
C15	0.2005E-05	0.2200E-06	0.1419E-06
C17	-0.2360E-06	0.1344E-06	0.1046E-06
C19	0.1098E-05	0.4176E-06	0.1021E-06
C21	0.4660E-06	0.5764E-07	0.7236E-07
Y	0.26318	0.46261	0.45429
Z	0.02075	0.01146	0.00826

表 1

f w	広角端の結像光学系焦点距離[mm]	4.402
f t	望遠端の結像光学系焦点距離[mm]	13.195
f G 1	第1レンズ群の焦点距離[mm]	-10.906
f G 1 p	第1レンズ群の形状可変ミラーより撮像面側に配置されたレンズ群の焦点距離[mm]	67.561
f G 2	第2レンズ群の焦点距離[mm]	18.452
f G 3	第3レンズ群の焦点距離[mm]	-20.303
f G 4	第4レンズ群の焦点距離[mm]	12.976
f G 5	第5レンズ群の焦点距離[mm]	10.306

$ \delta $	レンズのシフト偏心の最大値[mm]	0.189
$ \varepsilon $	レンズ、撮像面のティルト偏心の最大値[deg]	1.146
d1	形状可変ミラーと、形状可変ミラーの物体側に配置されたレンズとの距離[mm]	7.599
d2	形状可変ミラーと、形状可変ミラーの撮像面側に配置されたレンズとの距離[mm]	4.640
$ \theta $	形状可変ミラーによる軸上主光線の折り曲げ角[deg]	90.000

表 2

d 1 / f w	1.726
d 2 / f w	1.054
f G 1 / f w	-2.478
f G 1 p / f w	15.348
f G 2 / f w	4.192
f G 3 / f w	-4.612
f G 4 / f w	2.948
f G 5 / f w	2.341
$\delta / f w$	0.043
$ \varepsilon $ [deg]	1.146
$ \theta $ [deg]	90.000

表 3

物体距離	ズーム状態	C_4 (x^2 の係数)	C_6 (y^2 の係数)
∞ 余裕	広角端	0.000E+00	0.000E+00
∞ 余裕	標準状態	0.000E+00	0.000E+00
∞ 余裕	望遠端	0.000E+00	0.000E+00
∞	広角端	-5.900E-04	-2.942E-04
∞	標準状態	-2.265E-04	-1.118E-04
∞	望遠端	-1.063E-04	-5.118E-05
3 0 0 mm	広角端	-8.999E-04	-4.603E-04
3 0 0 mm	標準状態	-5.520E-04	-2.822E-04
3 0 0 mm	望遠端	-4.454E-04	-2.330E-04
3 0 0 mm 余裕	広角端	-1.430E-03	-7.424E-04
3 0 0 mm 余裕	標準状態	-7.664E-04	-3.990E-04
3 0 0 mm 余裕	望遠端	-5.480E-04	-2.865E-04

実施例 2 の数値データ

焦点距離 : 4.4mm～13.2mm

開放Fナンバー : 2.4～5.3

撮像面のサイズ : 4.0mm×3.0mm

面番号	曲率半径	面間隔	偏心	屈折率	アッペ数
1	-60.147	1.20		1.7800	50.0
2	ASP[1]	11.80			
3	20.572	1.50		1.8500	24.0
4	29.740	D1			
5	20.562	1.00		1.8500	24.0
6	10.065	2.10		1.6173	57.3
7	ASP[2]	D2			
8	-14.713(s)	1.00		1.7281	49.0
9	11.104	1.35		1.8500	24.0
10	67.284	D3			
11	ASP[3]	3.52		1.4900	70.0
12	ASP[4]	0.85			
13	9.942	2.82		1.5269	65.1
14	-7.400	3.83		1.7727	31.2
15	4.218	D4			
16	7.388	2.09		1.4900	70.0
17	-13.557	0.30			
18	∞	1.44		1.5477	62.8
19	∞	0.10			
20	∞	0.60		1.5163	64.1
21	∞	0.50			

22 ∞ (像面)

WE ~ ST ~ TE

D1 = 8.71 ~ 1.77 ~ 0.10

D2 = 1.57 ~ 8.51 ~ 10.18

D3 = 8.14 ~ 6.04 ~ 0.20

D4 = 3.60 ~ 5.69 ~ 11.53

ASP[1]

曲率半径 7.023 k 0.0000e+000

a -3.8281e-004 b -3.9939e-006 c -7.2678e-008 d -6.9757e-010

ASP[2]

曲率半径 -16.106 k 0.0000e+000

a 4.3370e-005 b 3.2495e-008 c 8.9602e-009 d -3.8588e-010

ASP[3]

曲率半径 7.615 k 0.0000e+000

a -1.8702e-004 b -7.1210e-007 c 9.0747e-008 d -9.0563e-009

ASP[4]

曲率半径 -12.045 k 0.0000e+000

a 2.7967e-004 b 2.4104e-006 c -1.2665e-007 d -4.1114e-009

表 4

f w	広角端の結像光学系焦点距離 [mm]	4.399
f t	望遠端の結像光学系焦点距離 [mm]	13.200
f G 1	第1レンズ群の焦点距離 [mm]	-10.652
f G 2	第2レンズ群の焦点距離 [mm]	18.093
f G 3	第3レンズ群の焦点距離 [mm]	-19.401
f G 4	第4レンズ群の焦点距離 [mm]	12.812
f G 5	第5レンズ群の焦点距離 [mm]	10.090

表 5

f G 1 / f w	-2.421
f G 2 / f w	4.113
f G 3 / f w	-4.410
f G 4 / f w	2.912
f G 5 / f w	2.294

本発明による結像光学系は、フィルムカメラ、デジタルカメラ、ビデオカメラ、テレビカメラ、携帯端末（PDA）用のカメラ、携帯電話用のカメラ、車載カメラ、監視カメラ、ロボットの眼、電子内視鏡等に適用可能である。

以下、本発明に適用可能な光学特性可変光学素子としての光学特性可変形状鏡、光学特性可変焦点レンズの構成例について説明する。

（可変形状鏡の例 1）

図 9 は本発明の光学装置として使用されるデジタルカメラのケプラー式ファインダーの概略構成図、すなわち、観察光学系に可変形状鏡を適用した場合の概略構成図として示す。この可変形状鏡の構成は、もちろん、銀塩フィルムカメラの観察光学系にも使うことができる。まず、光学特性可変形状鏡 409 について説明する。

光学特性可変形状鏡 409 は、電極 409 k と変形可能な基板 409 j と、この基板 409 j の上にアルミニウムがコーティングされて反射面として機能する薄膜（反射面）409 a とからなる 3 層構成の変形層の周辺部が、支持台 423 の上に固定されており、また電極 409 k に対して間隔を設けた複数の電極 409 b が前記支持台 423 の下側に固定されてなる光学特性可変形状鏡（以下、単に可変形状鏡と言う。）であり、411 a は各電極 409 b にそれぞれ接続された複数の可変抵抗器、412 は可変抵抗器 411 b と電源スイッチ 413 を介して電極 409 k と電極 409 b 間に接続された電源、414 は複数の可変抵抗器 411 a の抵抗値を制御するための演算装置、415、416 及び 417 はそれ

ぞれ演算装置 4 1 4 に接続された温度センサー、湿度センサー及び距離センサーで、これらは図示のように配設されて 1 つの光学装置を構成している。

なお、対物レンズ 9 0 2、接眼レンズ 9 0 1、及び、プリズム 4 0 4、二等辺直角プリズム 4 0 5、ミラー 4 0 6 及び可変形状鏡 4 0 9 の各面は、平面でなくてもよく、球面、回転対称非球面その他、光軸に対して偏心した球面、平面、回転対称非球面、あるいは、対称面を有する非球面、対称面を 1 つだけ有する非球面、対称面のない非球面、自由曲面、微分不可能な点又は線を有する面等、いかなる形状をしていてもよく、さらに、反射面でも屈折面でも光に何らかの影響を与え得る面ならばよい。以下、これらの面を総称して拡張曲面という。なお、偏心 (decentration) とは displacement(shift) と tilt の一方、あるいは両方を意味する。

また、薄膜 4 0 9 a は、例えば、P.Rai-choudhury 編、Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication, Volume 2: Micromachining and Microfabrication, P495, Fig.8.58, SPIE PRESS 刊や Optics Communication, 140 巻 (1997 年) P187~190 に記載されているメンブレインミラーのように、複数の電極 4 0 9 b と電極 4 0 9 k との間に電圧が印加されると、静電気力により薄膜 4 0 9 a が変形してその面形状が変化するようになっている。これにより、観察者の視度に合わせたピント調整ができるだけでなく、さらに、レンズ 9 0 1、9 0 2 及び／又はプリズム 4 0 4、二等辺直角プリズム 4 0 5、ミラー 4 0 6 の温度や湿度変化による変形や屈折率の変化、あるいは、レンズ枠の伸縮や変形及び光学素子、枠等の部品の組立誤差による結像性能の低下が抑制され、常に適正にピント調整並びにピント調整で生じた収差の補正が行われ得る。なお、電極 4 0 9 b の形は、例えば図 1 1 及び図 1 2 に示すように、同じ分割または矩形分割にして薄膜 4 0 9 a の変形のさせ方に応じて選べばよい。

前記形状可変鏡 4 0 9 を用いた場合、物体からの光は、対物レンズ 9 0 2 及びプリズム 4 0 4 の各入射面と射出面で屈折され、可変形状鏡 4 0 9 で反射され、プリズム 4 0 4 を透過して、二等辺直角プリズム 4 0 5 でさらに反射され (図 9 中、光路中の + 印は、紙面の裏側へ向かって光線が進むことを示している。)、ミラー 4 0 6 で反射され、接眼レンズ 9 0 1 を介して眼に入射するようになって

いる。このように、レンズ 901, 902、プリズム 404, 405、及び、可変形状鏡 409 によって、光学装置の観察光学系を構成し、これらの各光学素子の面形状と肉厚を最適化することにより、物体面の収差を最小にすることができるようになっている。

すなわち、反射面として機能する薄膜 409 a の形状は、結像性能が最適になるように演算装置 414 からの信号により各可変抵抗器 411 a の抵抗値を変化させることにより制御される。すなわち、演算装置 414 へ、温度センサー 415、湿度センサー 416 及び距離センサー 417 から周囲温度及び湿度並びに物体までの距離に応じた大きさの信号が入力され、演算装置 414 は、これらの入力信号に基づき周囲の温度及び湿度条件と物体までの距離による結像性能の低下を補償すべく、薄膜 409 a の形状が決定されるような電圧を電極 409 b に印加するように、可変抵抗器 411 a の抵抗値を決定するための信号を出力する。このように、薄膜 409 a は電極 409 b に印加される電圧すなわち静電気力で変形させられるため、その形状は状況により非球面を含む様々な形状をとる。なお、距離センサー 417 はなくてもよく、その場合、固体撮像素子 408 からの像の信号の高周波成分が略最大になるように、デジタルカメラの撮像光学系としての撮像レンズ 403 を動かし、その位置から逆に物体距離を算出し、可変形状鏡を変形させて観察者の眼にピントが合うようにすればよい。

また、変形可能な基板 409 j をポリイミド等の合成樹脂で製作すれば、低電圧でも大きな変形が可能であるので好都合である。なお、プリズム 404 と可変形状鏡 409 を一体的に形成してユニット化することができる。また、図示を省略したが、可変形状鏡 409 の基板上に固体撮像素子 408 をリソグラフィープロセスにより一体的に形成してもよい。

また、レンズ 901, 902、プリズム 404, 405、ミラー 406 は、プラスチックモールド等で形成することにより任意の所望形状の曲面を用意に形成することができ、製作も簡単である。なお、上記の説明では、レンズ 901, 902 がプリズム 404 から離れて形成されているが、レンズ 901, 902 を設けることなく収差を除去することができるようにプリズム 404, 405、ミラー 406、可変形状鏡 409 を設計すれば、プリズム 404, 405、可変形状

鏡 4 0 9 は 1 つの光学ブロックとなり、組立が容易となる。また、レンズ 9 0 1、9 0 2、プリズム 4 0 4、4 0 5、ミラー 4 0 6 の一部あるいは全部をガラスで作製してもよく、このように構成すれば、さらに精度の良い観察光学系が得られる。可変形状鏡の反射面の形状は自由曲面にするように制御するのが良い。なぜなら、収差補正が容易にでき、有利だからである。

なお、図 9 の例では、演算装置 4 1 4、温度センサー 4 1 5、湿度センサー 4 1 6、距離センサー 4 1 7 を設け、温湿度変化、物体距離の変化等も可変形状鏡 4 0 9 で補償するようにしたが、そうではなくてもよい。つまり、演算装置 4 1 4、温度センサー 4 1 5、湿度センサー 4 1 6、距離センサー 4 1 7 を省き、観察者の視度変化のみを可変形状鏡 4 0 9 で補正するようにしてもよい。

(可変形状鏡の例 2)

図 1 0 は可変形状鏡 4 0 9 の他の例を示す概略構成図である。本例の可変形状鏡は、薄膜 4 0 9 a と、複数の電極 4 0 9 b との間に圧電素子 4 0 9 c が介装されていて、これらが支持台 4 2 3 上に設けられている。そして、圧電素子 4 0 9 c に加わる電圧を各電極 4 0 9 b 毎に変えることにより、圧電素子 4 0 9 c に部分的に異なる伸縮を生じさせて、薄膜 4 0 9 a の形状を変えることができるようになっている。電極 4 0 9 b の形は、図 1 1 に示すように、同心分割であってもよいし、図 1 2 に示すように、矩形分割であってもよく、その他、適宜の形のものを選択することができる。

図 1 0 中、4 2 4 は演算装置 4 1 4 に接続されたブレセンサーであって、例えば撮影時においてデジタルカメラの振れを検知し、振れによる像の乱れを補償するように薄膜（反射面）4 0 9 a を変形させるべく、演算装置 4 1 4 及び可変抵抗器 4 1 1 を介して電極 4 0 9 b に印加される電圧を変化させる。このとき、温度センサー 4 1 5、湿度センサー 4 1 6 及び距離センサー 4 1 7 からの信号も同時に考慮され、ピント合わせ、温度と湿度の補償等が行われる。この場合、薄膜 4 0 9 a には圧電素子 4 0 9 c の変形に伴う応力が加わるので、薄膜 4 0 9 a の厚さはある程度厚めに作られて相応の強度を持たせるようにするのがよい。なお、圧電素子 4 0 9 c は、用いる材料によっては、後述するように、4 0 9 c - 1、4 0 9 c - 2 のような 2 層の構造にしてもよい。

(可変形状鏡の例 3)

図 1 3 は可変形状鏡 4 0 9 のさらに他の例を示す概略構成図である。本例の可変形状鏡は、薄膜 4 0 9 a と複数の電極 4 0 9 b の間に介置される圧電素子が逆方向の圧電特性を持つ材料で作られた 2 枚の圧電素子 4 0 9 c 及び 4 0 9 c' で構成されている点で、図 1 0 に示された可変形状鏡とは異なる。すなわち、圧電素子 4 0 9 c と 4 0 9 c' が強誘電性結晶で作られているとすれば、結晶軸の向きが互いに逆になるように配置される。この場合、圧電素子 4 0 9 c と 4 0 9 c' は電圧が印加されると逆方向に伸縮するので、薄膜（反射面） 4 0 9 a を変形させる力が図 1 0 に示した例の場合よりも強くなり、結果的にミラー表面の形を大きく変えることができるという利点がある。図 1 3 で示した他の符号は図 1 0 と同じである。

圧電素子 4 0 9 c , 4 0 9 c' に用いる材料としては、例えばチタン酸バリウム、ロッシェル塩、水晶、電気石、リン酸二水素カリウム (KDP)、リン酸二水素アンモニウム (ADP)、ニオブ酸リチウム等の圧電物質、同物質の多結晶体、同物質の結晶、 $PbZrO_3$ と $PbTiO_3$ の固溶体の圧電セラミックス、二フッ化ポリビニール (PVDF) 等の有機圧電物質、上記以外の強誘電体等があり、特に有機圧電物質はヤング率が小さく、低電圧でも大きな変形が可能であるので、好ましい。なお、これらの圧電素子を利用する場合、厚さを不均一にすれば、上記各例において薄膜 4 0 9 a の形状を適切に変形させることも可能である。

また、圧電素子 4 0 9 c , 4 0 9 c' の材料としては、ポリウレタン、シリコンゴム、アクリルエラストマー、PZT、PLZT、ポリフッ化ビニリデン (PVDF) 等の高分子圧電体、シアン化ビニリデン共重合体、ビニリデンフルオライドとトリフルオロエチレンの共重合体等が用いられる。圧電性を有する有機材料や、圧電性を有する合成樹脂、圧電性を有するエラストマー等を用いると可変形状鏡面の大きな変形が実現できてよい。

なお、図 1 0、図 1 3 の圧電素子 4 0 9 c に電歪材料、例えば、アクリルエラストマー、シリコンゴム等を用いる場合には、圧電素子 4 0 9 c の層を基板 4 0 9 c-1 と電歪材料 4 0 9 c-2 を貼り合わせた 2 層の構造にしてもよい。

(可変形状鏡の例 4)

図 1 4 は可変形状鏡 4 0 9 のさらに他の例を示す概略構成図である。本例の可変形状鏡は、圧電素子 4 0 9 c が薄膜 4 0 9 a と複数の電極 4 0 9 d とにより挟持され、これらが支持台 4 2 3 上に設けられている。そして、薄膜 4 0 9 a と電極 4 0 9 d 間の圧電素子 4 0 9 c には、演算装置 4 1 4 により制御される駆動回路 4 2 5 a を介して電圧が印加されるようになっている。さらにこれとは別に、支持台 4 2 3 の内部底面上に設けられた複数の電極 4 0 9 b にも演算装置 4 1 4 により制御される駆動回路 4 2 5 b を介して電圧が印加されるように構成されている。したがって、薄膜 4 0 9 a は、薄膜 4 0 9 a と電極 4 0 9 d との間に印加される電圧と電極 4 0 9 b に印加される電圧による静電気力とにより二重に変形され得、上記実施例に示した何れのものよりもより多くの変形パターンが可能であり、かつ、応答性も速いという利点がある。図 1 4 で示した他の符号は図 1 0 と同じである。

そして、薄膜 4 0 9 a、電極 4 0 9 d 間の電圧の符号を変えれば、可変形状鏡の薄膜 4 0 9 a を凸面にも凹面にも変形させることができる。その場合、大きな変形を圧電効果で行い、微細な形状変化を静電気力で行ってもよい。また、凸面の変形には圧電効果を主に用い、凹面の変形には静電気力を主に用いてもよい。なお、電極 4 0 9 d は 1 つの電極で構成されてもよく、または電極 4 0 9 b のように複数の電極から構成されてもよい。この複数の電極から構成された電極 4 0 9 d の様子を図 1 4 に示した。なお、説明では、圧電効果と電歪効果、電歪をすべてまとめて圧電効果と述べている。従って、電歪材料も圧電材料に含むものとする。

(可変形状鏡の例 5)

図 1 5 は可変形状鏡 4 0 9 のさらに他の例を示す概略構成図である。本例の可変形状鏡は、電磁気力を利用して反射面の形状を変化させ得るようにしたもので、支持台 4 2 3 の内部底面上には永久磁石 4 2 6 が固定されており、頂面上には窒化シリコン又はポリイミド等からなる基板 4 0 9 e の周縁部が載置されて固定されており、基板 4 0 9 e の表面にはアルミニウム等の金属コートで作られた薄膜 4 0 9 a が付設されていて、可変形状鏡 4 0 9 を構成している。基板 4 0 9 e の

下面には複数のコイル 4 2 7 が固定して取り付けられており、これらのコイル 4 2 7 はそれぞれ駆動回路 4 2 8 を介して演算装置 4 1 4 に接続されている。図 1 5 で示した他の符号は図 1 0 と同じである。したがって、各センサー 4 1 5, 4 1 6, 4 1 7, 4 2 4 からの信号によって演算装置 4 1 4 において求められる光学系の変化に対応した演算装置 4 1 4 からの出力信号により、各駆動回路 4 2 8 から各コイル 4 2 7 にそれぞれ適当な電流が供給されると、永久磁石 4 2 6 との間に働く電磁気力で各コイル 4 2 7 は反発又は吸着され、基板 4 0 9 e 及び薄膜 4 0 9 a を変形させる。

この場合、各コイル 4 2 7 はそれぞれ異なる量の電流を流すようにすることもできる。また、コイル 4 2 7 は 1 個でもよい。永久磁石 4 2 6 を基板 4 0 9 e の下面に取り付け、コイル 4 2 7 を支持台 4 2 3 の内部底面側に設けるようにしてもよい。また、コイル 4 2 7 はリソグラフィー等の手法で薄膜コイルとして作るとよく、さらに、コイル 4 2 7 には強磁性体よりなる鉄心を入れるようにしてもよい。

薄膜コイルの場合、薄膜コイル 4 2 7 の巻密度を、図 1 6 に示すように、基板 4 0 9 e の下面の場所によって変化させたコイル 4 2 8' とすることにより、基板 4 0 9 e 及び薄膜 4 0 9 a に所望の変形を与えるようにすることもできる。また、コイル 4 2 7 は 1 個でもよいし、また、これらのコイル 4 2 7 には強磁性体よりなる鉄心を挿入してもよい。

(可変形状鏡の例 6)

図 1 7 は可変形状鏡 4 0 9 のさらに他の例を示す概略構成図である。図 1 7 で示した他の符号は図 1 0 と同じである。本例の可変形状鏡では、基板 4 0 9 e は鉄等の強磁性体で作られており、反射膜としての薄膜 4 0 9 a はアルミニウム等からなっている。そして、基板 4 0 9 e の周縁部は、支持台 4 2 3 の頂面部に載置されて固定されている。コイル 4 2 7 は支持台 4 2 3 の内部底面側に固定されている。この場合、薄膜コイルを基板 4 0 9 e の下面に設けなくてもすむから、構造が簡単で、製造コストを低減することができる。また、電源スイッチ 4 1 3 を切換え兼電源開閉用スイッチに置換すれば、コイル 4 2 7 に流れる電流の方向を変えることができ、基板 4 0 9 e 及び薄膜 4 0 9 a の形状を自由に変えること

ができる。

図 1 8 は薄膜 4 0 9 a および基板 0 9 e に対して配置するコイル 4 2 7 の配置例を示し、図 1 9 はコイル 4 2 7 の他の配置例を示しているが、これらの配置は、図 1 5 に示した例にも適用することができる。なお、図 2 0 は、コイル 4 2 7 の配置を図 1 9 に示したように放射状にした場合に適する永久磁石 4 2 6 の配置を示している。すなわち、図 2 0 に示すように、棒形状の永久磁石 4 2 6 を放射状に配置すれば、図 1 5 に示した例に比べて、微妙な変形を基板 4 0 9 e 及び薄膜 4 0 9 a に与えることができる。また、このように電磁気力を用いて基板 4 0 9 e 及び薄膜 4 0 9 a を変形させる場合（図 1 5 及び図 1 7 の例）は、静電気力を用いた場合よりも低電圧で駆動できるという利点がある。

以上いくつかの可変形状鏡の例を述べたが、薄膜で形成されるミラーの形状を変形させるのに、図 1 4 の例に示すように、2 種類以上の力を用いてもよい。つまり静電気力、電磁力、圧電効果、磁歪、流体の圧力、電場、磁場、温度変化、電磁波等のうちから 2 つ以上を同時に用いて可変形状鏡を変形させてもよい。つまり 2 つ以上の異なる駆動方法を用いて光学特性可変光学素子を作れば、大きな変形と微細な変形とを同時に実現でき、精度の良い鏡面が実現できる。

（可変形状鏡の例 7）

図 2 1 は光学装置の撮像光学系に可変形状鏡 4 0 9 を用いた構成、例えば携帯電話のデジタルカメラ、カプセル内視鏡、電子内視鏡、パソコン用デジタルカメラ、PDA 用デジタルカメラ等に用いられる撮像光学系に可変形状鏡を用いた場合の概略構成図である。本例の撮像光学系は、可変形状鏡 4 0 9 と、レンズ 9 0 2 と、固体撮像素子 4 0 8 と、制御系 1 0 3 とで一つの撮像ユニット 1 0 4、すなわち、1 つの光学装置を構成している。本例の撮像ユニット 1 0 4 では、レンズ 9 0 2 を通った物体からの光は可変形状鏡 4 0 9 の薄膜（反射面）4 0 9 a で反射される際に集光され、固体撮像素子 4 0 8 の上に結像する構成となっている。可変形状鏡 4 0 9 は、光学特性可変光学素子の一種であり、可変焦点ミラーとも呼ばれている。

本例によれば、物体距離が変わっても可変形状鏡 4 0 9 の反射面 4 0 9 a を変形させることでピント合わせをすることができ、レンズ 9 0 2 をモータ等で駆動

する必要がなく、小型化、軽量化、低消費電力化の点で優れている。また、撮像ユニット 104 は本発明の撮像光学系としてすべての実施例で用いることができる。また、可変形状鏡 409 を複数用いることでズームの撮像光学系、変倍の撮像光学系、等の各光学系を作ることができる。

なお、図 21 では、制御系 103 にコイルを用いたトランスの昇圧回路を含む制御系の構成例を示している。特に積層型圧電トランスを用いると、小型化できてよい。昇圧回路は本発明のすべての電氣を用いる可変形状鏡、可変焦点レンズに用いることができるが、特に静電気力、圧電効果を用いる場合の可変形状鏡、可変焦点レンズに有用である。

(可変形状鏡の例 8)

図 22 は可変形状鏡のさらに他の例に係る概略構成図である。この図 22 は、マイクロポンプ 180 で管路 161a 内の流体 161 を出し入れし、支持台 189a の上面に張って設けて反射膜 189 の表面であるミラー面を変形させる可変形状鏡 188 の構成となっている。本例によれば、ミラー面を大きく変形させることが可能になるというメリットがある。なお、支持台 189a とマイクロポンプ 180 を接続する管路の間には、前記支持台 189a の内部に流体 161 を所定量供給することができるように、液溜 168 が設けられている。

マイクロポンプ 180 は、例えば、マイクロマシンの技術で作られた小型のポンプで、電力で動くように構成されている。マイクロマシンの技術で作られたポンプの例としては、熱変形を利用したもの、圧電材料を用いたもの、静電気力を用いたものなどがある。

図 23 は前記マイクロポンプ 180 の概略構成図である。マイクロポンプ 180 では、流体 161 を出し入れする振動板 181 は静電気力、圧電効果等の電氣力により振動する。図 23 では静電気力により振動する例を示しており、図 23 中、182, 183 は電極である。また、点線は変形した時の振動板 181 を示している。振動板 181 の振動に伴い、2つの弁 184, 185 の先端部 184a, 185a が開閉し、流体 161 を右から左へ送るようになっている。

図 22 で示した可変形状鏡 188 では、反射膜 189 が流体 161 の量に応じて凹凸に変形することで、反射膜 189 の表面は可変形状鏡として機能する。可

変形状鏡 1 8 8 は流体 1 6 1 で駆動されている。流体としては、シリコンオイル、空気、水、ゼリー、等の有機物、無機物を用いることができる。

なお、静電気力、圧電効果を用いた可変形状鏡、可変焦点レンズなどにおいては、駆動用に高電圧が必要になる場合がある。その場合には、例えば図 2 1 に示すように、昇圧用のトランス、あるいは圧電トランス等を用いて制御系を構成するとよい。

また、反射用の薄膜 4 0 9 a および反射膜 1 8 9 は、支持台 4 2 3 または支持台 1 8 9 a に固定した部分を、変形しない部分として設けておくと、可変形状鏡の形状を干渉計等で測定する場合に、基準面として使うことができ便利である。

(可変焦点レンズの例 9)

図 2 4 は光学系に、可変焦点レンズを可変焦点ミラーとして用いる例を示すものである。この可変焦点ミラー 5 6 5 は、第 1, 第 2 の面 5 6 6 a, 5 6 6 b を有する第 1 の透明基板 5 6 6 と、第 3, 第 4 の面 5 6 7 a, 5 6 7 b を有する第 2 の透明基板 5 6 7 とを有する。第 1 の透明基板 5 6 6 は、平板状またはレンズ状に形成して、内面 (第 2 の面) 5 6 6 b に透明電極 5 1 3 a を設け、第 2 の透明基板 5 6 7 は、内面 (第 3 の面) 5 6 7 a を凹面状に形成して、該凹面上に反射膜 5 6 8 を施し、さらにこの反射膜 5 6 8 上に透明電極 5 1 3 b を設ける。透明電極 5 1 3 a, 5 1 3 b 間には、高分子分散液晶層 5 1 4 を設け、これら透明電極 5 1 3 a, 5 1 3 b をスイッチ 5 1 5 および可変抵抗器 5 1 9 を経て交流電源 5 1 6 に接続して、高分子分散液晶層 5 1 4 に交流電圧を印加するようにする。なお、図 2 4 では、液晶分子の図示を省略してある。

かかる構成によれば、透明基板 5 6 6 側から入射する光線は、反射膜 (反射面) 5 6 8 により高分子分散液晶層 5 1 4 を折り返す光路となるので、高分子分散液晶層 5 1 4 の作用を 2 回もたせることができると共に、高分子分散液晶層 5 1 4 への印加電圧を変えることにより、反射光の焦点位置を変えることができる。この場合、可変焦点ミラー 5 6 5 に入射した光線は、高分子分散液晶層 5 1 4 を 2 回透過するので、高分子分散液晶層 5 1 4 の厚さの 2 倍を t とすれば、上記の各式を同様に用いることができる。なお、透明基板 5 6 6 または 5 6 7 の内面を、図 2 1 に示したように回折格子状にして、高分子分散液晶層 5 1 4 の厚さを薄

くすることもできる。このようにすれば、散乱光をより少なくできる利点がある。

なお、以上の説明では、液晶の劣化を防止するため、電源として交流電源 5 1 6 を用いて、液晶層に交流電圧を印加するようにしたが、直流電源を用いて液晶層に直流電圧を印加するようにすることもできる。また、液晶分子の方向を変える方法としては、電圧を変化させること以外に、液晶層にかかる電場の周波数、液晶層にかかる磁場の強さ及び/又は周波数、あるいは液晶層の温度等を変化させることによってよい。なお、図 2 4 のような形状の変化しない可変焦点ミラーも、形状可変鏡の中に含めるものとする。

図 2 4 で述べたような、高分子分散液晶層を形成する媒質の屈折率が変化することで、光学素子の焦点距離等が変化するタイプの光学素子のメリットは、形状が変化しないため機械設計が容易である、機械的構造が簡単になる、等である。

(可変形状鏡の例 9)

図 2 5 は可変形状鏡のさらに他の例を示す概略構成図である。本例では、デジタルカメラに用いられるものとして説明する。なお、図 2 5 中、4 1 1 は可変抵抗器、4 1 4 は演算装置、4 1 5 は温度センサー、4 1 6 は湿度センサー、4 1 7 は距離センサー、4 2 4 は振れセンサーである。

本例の可変形状鏡 4 5 は、アクリルエラストマー等の有機材料からなる電歪材料 4 5 3 と間を隔てて複数に分割した分割電極 4 0 9 b を設け、電歪材料 4 5 3 の上に順に電極 4 5 2、変形可能な基板 4 5 1 を設け、さらにその上に入射光を反射するアルミニウム等の金属からなる反射膜 4 5 0 を設けて構成されている。従って、可変形状鏡 4 5 の変形層は 4 層構成となっている。

このように構成すると、分割電極 4 0 9 b を電歪材料 4 5 3 と一体化した場合に比べて、反射膜（反射面）4 5 0 の面形状が滑らかになり、光学的に収差を発生させるにくくなるというメリットがある。なお、変形可能な基板 4 5 1 と電極 4 5 2 の配置は逆でも良い。

また、図 2 5 中、4 4 9 は光学系の変倍、あるいはズームを行う釦であり、可変形状鏡 4 5 は、釦 4 4 9 を使用者が押すことで反射膜 4 5 0 の形を変形させて、変倍あるいは、ズームをすることができるよう演算装置 4 1 4 を介して制御

されるようになっている。

なお、アクリルエラストマー等の有機材料からなる電歪材料のかわりに既に述べたチタン酸バリウム等の圧電材料を用いてもよい。

なお、上記で説明した各可変形状鏡に共通して言えることであるが、反射面の変形する部分を反射面に垂直な方向から見た時の形は、軸上光線の入射面の方向に長い形状、例えば楕円、卵形、多角形、等にするのが良い。なぜなら、可変形状鏡は、光線が斜入射した状態で用いる場合が多い。このとき発生する収差を抑えるためには、反射面の形状は回転楕円面、回転放物面、回転双曲面に近い形が良い。その形に可変形状鏡の反射面を変形させるためには、反射面の変形する部分を反射面に垂直な方向から見た時に、軸上光線の入射面の方向に長い形状にしておくのが良いからである。

最後に、本発明で用いる用語の定義を述べておく。

光学装置とは、光学系あるいは光学素子を含む装置のことである。光学装置単体で機能しなくてもよい。つまり、装置の一部でもよい。光学装置には、撮像装置、観察装置、表示装置、照明装置、信号処理装置等が含まれる。

撮像装置の例としては、フィルムカメラ、デジタルカメラ、ロボットの眼、レンズ交換式デジタル一眼レフカメラ、テレビカメラ、動画記録装置、電子動画記録装置、カムコーダ、VTRカメラ、電子内視鏡等がある。デジカメ、カード型デジカメ、テレビカメラ、VTRカメラ、動画記録カメラなどはいずれも電子撮像装置の一例である。

観察装置の例としては、顕微鏡、望遠鏡、眼鏡、双眼鏡、ルーペ、ファイバースコープ、ファインダー、ビューファインダー等がある。

表示装置の例としては、液晶ディスプレイ、ビューファインダー、ゲームマシン（ソニー社製プレイステーション）、ビデオプロジェクター、液晶プロジェクター、HMD（頭部装着型画像表示装置）、PDA（携帯情報端末）、携帯電話等がある。

照明装置の例としては、カメラのストロボ、自動車のヘッドライト、内視鏡光源、顕微鏡光源等がある。

信号処理装置の例としては、携帯電話、パソコン、ゲームマシン、光ディスク

の読取・書込装置、光計算機の演算装置等がある。

なお、本発明の光学系は小型軽量なので、電子撮像装置、信号処理装置、特に、デジタルカメラ、携帯電話の撮像系に用いると効果がある。

撮像素子は、例えばCCD、撮像管、固体撮像素子、写真フィルム等を指す。また、平行平板はプリズムの1つに含まれるものとする。観察者の変化には、視度の変化を含むものとする。被写体の変化には、被写体となる物体距離の変化、物体の移動、物体の動き、振動、物体のブレ等を含むものとする。

拡張曲面の定義は以下の通りである。

球面、平面、回転対称非球面のほか、光軸に対して偏心した球面、平面、回転対称非球面、あるいは対称面を有する非球面、対称面を1つだけ有する非球面、対称面のない非球面、自由曲面、微分不可能な点や線を有する面等、いかなる形をしていても良い。反射面でも、屈折面でも、光になんらかの影響を与えうる面ならば良い。本発明では、これらを総称して拡張曲面と呼ぶことにする。

光学特性可変光学素子とは、可変焦点レンズ、可変形状鏡、面形状の変わる偏光プリズム、頂角可変プリズム、光偏向作用の変わる可変回折光学素子、つまり可変HOE、可変DOE等を含む。可変焦点レンズには、焦点距離が変化せず、収差量が変化するような可変レンズも含むものとする。可変形状鏡についても同様である。要するに、光学素子で、光の反射、屈折、回折等の光偏向作用が変化しうるものを光学特性可変光学素子と呼ぶ。

情報発信装置とは、携帯電話、固定式の電話、ゲームマシン、テレビ、ラジカセ、ステレオ等のリモコンや、パソコン、パソコンのキーボード、マウス、タッチパネル等の何らかの情報を入力し、送信することができる装置を指す。撮像装置のついたテレビモニター、パソコンのモニター、ディスプレイも含むものとする。情報発信装置は、信号処理装置の中に含まれる。

以上のような本発明によるズーム光学系は、フィルムカメラ、デジタルカメラ、テレビカメラ、携帯端末用のカメラ、監視カメラ、ロボットの眼、電子内視鏡等に適用可能である。

また、上述のズーム光学系では、レンズ群中に反射面を有する構成のズーム光学系について説明したが、反射面を有しない構成のズーム光学系についても可変

形状面を備えた光学素子、例えば、可変焦点レンズ等を用いて構成すれば、小型化、低コスト化、省電力化、作動音の静音化等の効果を達成することが可能である。更に、可変形状面を有しない可変焦点ミラーを前記実施例に用いても良い。

What is claimed is:

1. 物体の像を形成する結像光学系であって、

最も物体側に配置された第1レンズ群と、該第1レンズ群と前記像の間に配置された少なくとも1つの第2レンズ群とを備え、

前記第2レンズ群のうち少なくとも一つが光軸方向に移動し、

前記第1レンズ群は、物体側から順に少なくとも一つの負の屈折力を持つレンズと、形状可変ミラーと、少なくとも一つの正の屈折力を持つレンズとを有し、

前記形状可変ミラーの変形によってフォーカシングを行う結像光学系。

2. 前記形状可変ミラーの物体側と像側に隣接してそれぞれ配置されたレンズ群を備え、下記条件のいずれか一方を満足する請求項1に記載の結像光学系。

$$0.1 < d1 / fw < 10.0$$

$$0.1 < d2 / fw < 10.0$$

ここで、 $d1$ は前記物体側に隣接配置されたレンズ群と前記形状可変ミラーとの間隔、 $d2$ は前記像側に隣接配置されたレンズ群と前記形状可変ミラーとの間隔、 fw は広角端における前記結像光学系の焦点距離である。

3. 以下の条件を満足することを特徴とする請求項1に記載の結像光学系。

$$0.2 < |fG1 / fw|$$

ここで、 $fG1$ は前記第1レンズ群の焦点距離、 fw は広角端における前記結像光学系の焦点距離である。

4. 前記移動する少なくとも1つのレンズ群が、以下の条件を満足する請求項1に記載の結像光学系。

$$0.1 < |fGm / fw|$$

ここで fGm は前記移動するレンズ群の焦点距離、 fw は広角端における前記結像光学系の焦点距離である。

5. 前記第1レンズ群は前記形状可変ミラーよりも像側に第3レンズ群を有し、以下の条件を満足する請求項1に記載の結像光学系。

$$0.1 < |f_{G1p} / f_w|$$

ここで f_{G1p} は前記第3レンズ群の焦点距離、 f_w は広角端における前記結像光学系の焦点距離である。

6. 前記形状可変ミラーは所定の範囲内で形状を変化させることができ、該所定の範囲内の一状態で以下の条件のいずれか一方を満足する請求項1に記載の結像光学系。

$$|C4 \times f_w| < 0.2$$

$$|C6 \times f_w| < 0.2$$

ここで、 $C4$ は前記形状可変ミラーの反射面の形状を X と Y の多項式で表したときの X^2 の項における係数、 $C6$ は前記多項式の Y^2 の項における係数、 f_w は広角端における前記結像光学系の焦点距離である。

7. 前記形状可変ミラーは、以下の条件を満足するように配置されている請求項1に記載の結像光学系。

$$35^\circ < \theta < 105^\circ$$

ここで、 θ は前記形状可変ミラーへ入射する軸上主光線の入射角と、前記形状可変ミラーから出射する軸上主光線の出射角の和である。

8. 結像光学系を構成する少なくとも1つの光学面が軸上主光線に対して略垂直方向にシフト偏心しており、以下の条件を満足する請求項1に記載の結像光学系。

$$|\delta / f_w| < 1.0$$

ここで、 δ は前記光学面のシフト偏心量、 f_w は広角端における前記結像光学系の焦点距離である。

9. 結像光学系を構成する少なくとも1つの光学面が軸上主光線に対して略垂

直方向の軸を中心としてティルト偏心しており、以下の条件を満足する請求項 1 に記載の結像光学系。

$$|\varepsilon| < 5.0 \text{ (deg)}$$

ここで、 ε (deg) は前記光学面のティルト偏心量である。

10. 前記第 1 レンズ群は負の屈折力を有し、

前記第 1 レンズ群と前記像の間に配置された前記第 2 レンズ群として、正の屈折力を持つ第 4 レンズ群と、負の屈折力を持つ第 5 レンズ群と、正の屈折力を持つ第 6 レンズ群と、第 7 レンズ群を備え、

前記光軸方向に移動する第 2 レンズ群は、前記第 4 レンズ群と前記第 6 レンズ群であり、

前記第 4 レンズ群と前記第 6 レンズ群は、それぞれ独立に移動する請求項 1 に記載の結像光学系。

11. 前記光軸方向に移動する第 2 レンズ群は、相対的に偏心している少なくとも 2 つのレンズを、該レンズ群中に有している請求項 1 または 10 に記載の結像光学系。

12. 前記結像光学系は絞りを備え、該絞りが変倍時に移動しない請求項 1 または 10 に記載の結像光学系。

13. 以下の条件を満足する請求項 1 または請求項 10 に記載の結像光学系。

$$|f_{G3}/f_w| < 15.0$$

ここで、 f_{G3} は前記第 5 レンズ群の焦点距離、 f_w は広角端における前記結像光学系の焦点距離である。

14. 前記第 1 レンズ群は負の屈折力を有する請求項 1 に記載の結像光学系。

15. 前記形状可変ミラーの代わりに可変ミラーを有している請求項 1 に記載の

結像光学系。

1 6. 物体側から順に、負の屈折力を持つ第 1 レンズ群と、正の屈折力を持つ第 2 レンズ群と、負の屈折力を持つ第 3 レンズ群と、正の屈折力を持つ第 4 レンズ群と、第 5 レンズ群を備え、

前記第 2 レンズ群と前記第 4 レンズ群が光軸方向に独立に移動し、

以下の条件のいずれか一方を満足する結像光学系。

$$0.1 < f_{G2} / f_w$$

$$0.1 < f_{G4} / f_w$$

ここで、 f_{G2} は前記第 2 レンズ群の焦点距離、 f_{G4} は前記第 4 レンズ群の焦点距離、 f_w は広角端における前記結像光学系の焦点距離である。

1 7. 前記第 1 レンズ群 $G1$ は、少なくとも一つの反射光学素子を有する請求項 1 6 に記載の結像光学系。

1 8. 前記反射光学素子の物体側と像側に隣接して配置されたレンズ群を更に備え、下記条件のいずれか一方を満足する請求項 1 6 に記載の結像光学系。

$$0.1 < D1 / f_w < 10.0$$

$$0.1 < D2 / f_w < 10.0$$

ここで、 $D1$ は前記物体側に隣接配置されたレンズ群と前記反射光学素子のとの間隔、 $D2$ は前記像側に隣接配置されたレンズ群と前記反射光学素子のとの間隔、 f_w は広角端における前記結像光学系の焦点距離である。

1 9. 以下の条件を満足することを特徴とする請求項 1 0 または請求項 1 4 に記載の結像光学系。

$$0.2 < |f_{G5} / f_w|$$

ここで、 f_{G5} は前記第 5 レンズ群の焦点距離、 f_w は広角端における前記結像光学系の焦点距離である。

2 0. 変倍時に光軸方向に移動するレンズ群を一つ以上有する結像光学系であつ

て、前記レンズ群は、相対的に偏心している少なくとも２つレンズを、該レンズ群中に有している結像光学系。

２１．少なくとも一つの光学特性可変素子を有する請求項２０に記載の結像光学系。

２２．前記光学特性可変素子が可変ミラーである請求項２１に記載の結像光学系。

２３．前記可変ミラーが形状可変ミラーである請求項２２に記載の結像光学系。

２４．請求項１乃至請求項２３の何れか１つに記載の結像光学系と、撮像素子を備えたことを特徴とする撮像装置。

２５．前記撮像素子が軸上主光線に対して略垂直方向の軸を中心としてティルト偏心しており、以下の条件を満足する請求項２４に記載の撮像装置。

$$|\varepsilon'| < 5.0 (\text{deg})$$

ここで、 ε' (deg)は前記撮像素子のティルト偏心量である。

ABSTRACT OF THE DISCLOSURE

本発明の結像光学系は、最も物体側に配置された第 1 レンズ群と、該第 1 レンズ群と像の間に配置されたレンズ群を少なくとも 1 つ備え、前記レンズ群のうちの少なくとも一つを光軸方向に移動させる。そして、前記第 1 レンズ群を、物体側から順に少なくとも一つの負の屈折力を持つレンズと、形状可変ミラーと、少なくとも一つの正の屈折力を持つレンズとで構成し、前記形状可変ミラーの変形によってフォーカシングを行う。